



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 199 48 618 A 1**

⑤ Int. Cl. 7:  
**G 01 R 33/022**  
G 01 R 33/035  
G 01 R 33/07  
G 01 R 33/09  
H 01 L 39/22

⑦1 Aktenzeichen: 199 48 618.2  
⑦2 Anmeldetag: 8. 10. 1999  
⑦3 Offenlegungstag: 17. 5. 2001

DE 199 48 618 A 1

⑦1 Anmelder:  
Siemens AG, 80333 München, DE

⑦2 Erfinder:  
Daalmans, Gabriel, 91315 Höchstadt, DE

⑤6 Entgegenhaltungen:

DE 195 09 230 A1  
DE 44 20 241 A1  
DE 44 19 297 A1  
DE 42 16 907 A1  
DE 41 25 087 A1

KAISER, G., u.a.: First experimental investigations on a thin film Hall magnetometer with a high temperature superconducting pick-up antenna.

In: Cryogenics, Vol.38, 1998, Num.6, S.625-629;

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

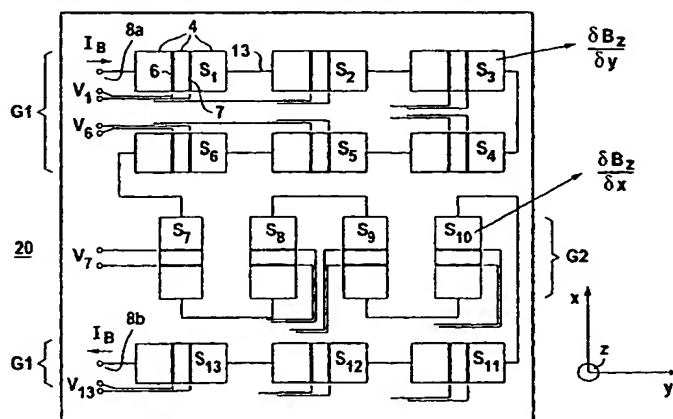
Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Magnetfeldsensitive Sensoreinrichtung mit einer Array-Anordnung mehrerer Sensoreinheiten

⑤7 Die magnetfeldsensitive Sensoreinrichtung weist mindestens eine planare Array-Anordnung (20) mehrerer Sensoreinheiten ( $S_1$ - $S_{13}$ ) auf, die jeweils eine als symmetrisches Gradiometer (4) gestaltete Flußantenne zur Magnetfelderfassung und einen zugeordneten Flußspannungswandler mit zwei linearen Sensorelementen (6, 7) enthalten. Die Sensorelemente sind so angeordnet und so hintereinandergeschaltet, daß sich ihre durch die gradientenfreien Anteile des Magnetfeldes hervorgerufenen Spannungssignale zumindest weitgehend kompensieren. Die Sensoreinheiten ( $S_1$ - $S_{13}$ ) sind in mindestens zwei Gruppen (G1, G2) unterschiedlicher Ausrichtung zur Erfassung unterschiedlich gerichteter Magnetfeldgradienten

$$\left( \frac{\partial B_z}{\partial x}, \frac{\partial B_z}{\partial y} \right)$$

unterteilt.



DE 199 48 618 A 1

BEST AVAILABLE COPY

## Beschreibung

Die Erfindung betrifft eine magnetfeldsensitive Sensoreinrichtung mit wenigstens einer Array-Anordnung mehrerer Sensoreinheiten in zumindest weitgehend planarem Aufbau. Eine solche Sensoreinrichtung geht aus der DE 44 20 241 A1 hervor.

Zu einer hochauflösenden Magnetfeldmessung wurden bisher Dünnsfilmsensoreinrichtungen in Form von SQUID-Magnetometern oder -Gradiometern vorgesehen. Solche Sensoreinrichtungen weisen eine supraleitende Flußantenne in Form einer Magnetometerschleife oder Gradiometerschleife auf, an die ein SQUID (Superconduction QUantum Interference Device) als ein Fluß-Spannungs-Wandler induktiv angekoppelt ist oder in die ein derartiges SQUID integriert ist (vgl. z. B. DE 42 16 907 A1 bzw. DE 41 25 087 A1). Als supraleitendes Material für eine derartige SQUID-Sensoreinrichtung ist auch sogenanntes Hoch- $T_c$ -Supraleitermaterial vorgesehen (vgl. z. B. DE 44 19 297 A1 oder die eingangs genannte DE 44 20 241 A1). Hierbei handelt es sich um bekannte oxidische Materialien, insbesondere auf Cuprat-Basis, deren Sprungtemperaturen im magnetischen Nullfeld über 77 K liegen und die deshalb prinzipiell eine Kühlung mit flüssigem Stickstoff ( $LN_2$ ) zulassen. Es zeigt sich jedoch, daß das Spannungssignal von solchen Supraleitungseinrichtungen bzw. ihrer SQUIDs keine lineare Proportionalität zu dem zu detektierenden Magnetfeld oder Magnetfeldgradienten zeigt und deshalb eine aufwendige Regelelektronik erforderlich wird.

Aus der eingangs genannten DE 44 20 241 A1 ist auch bekannt, für eine magnetfeldempfindliche Sensoreinrichtung mehrere ihrer SQUID-Sensoreinheiten zu einem Array in zumindest weitgehend planarem Aufbau anzuordnen. Hierzu enthält die Sensoreinrichtung ein Gradiometer bildende Antennenschleifen zur Erfassung eines Magnetfeldes, eine mit den Antennenschleifen verbundene supraleitende Einkoppeleinrichtung und mehrere, zu einer Reihe geschaltete, induktiv an die Einkoppeleinrichtung angekoppelte Gleichstrom-SQUIDs als Sensorelemente. Als Supraleitermaterial ist ein Hoch- $T_c$ -Material vorgesehen, wobei die SQUIDs und zumindest die Einkoppeleinrichtung jeweils mit einer einlagigen Struktur von Leiterbahnen aus diesem Material gebildet sind.

Im Vergleich zu Flußspannungswandlern mit SQUIDs sind solche mit Hallsensorelementen extrem linear. Ein entsprechendes Element ist bei der aus der eingangs genannten Literaturstelle "Cryogenics", Vol. 38, No. 6, 1998, Seiten 625 bis 629, zu entnehmenden Sensoreinrichtung vorgesehen. Die bekannte, in Dünnsilmtechnik erstellte Sensoreinrichtung weist eine als Magnetometer gestaltete Flußantenne aus Hoch- $T_c$ -Supraleitermaterial auf, an welche ein Dünnsilm-Hallsensorelement als ein Flußspannungswandler induktiv angekoppelt ist. Bei 77 K ist mit einer derartigen Sensoreinrichtung eine Auflösung von etwa  $8 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$  im Bereich des sogenannten weißen Rauschens zu erreichen. Es zeigt sich jedoch, daß mit einer derartigen Sensoreinrichtung in hohem Maße auch magnetische Störfelder detektiert werden, die das zu detektierende Magnetfeld in unerwünschter Weise überlagern. Mit einer derartigen Sensoreinrichtung ist deshalb eine hochauflösende Magnetfelddetektion zu gewährleisten praktisch nicht möglich.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, die aus der eingangs genannten DE 44 20 241 A1 bekannte Sensoreinrichtung mit einer Array-Anordnung mehrerer Sensoreinheiten dahingehend auszugestalten, daß mit ihr eine hohe Störfeldunterdrückung bei hochauflösender Magnetfelddetektion zu gewährleisten ist. Zugleich soll ein sehr einfacher

Dünnsilmaufbau zu realisieren sein. Als Dünnsilm wird hierbei jede Schicht mit einer Dicke von unter  $100 \mu\text{m}$  verstanden. Außerdem soll im Fall einer Verwendung von supraleitenden Flußantennen ein Aufbau zu realisieren sein, der durch eine Begrenzung der Anzahl der erforderlichen elektrischen Verbindungsleitungen eine entsprechende Begrenzung der Verluste bei einem Warm-kalt-Übergang ermöglicht.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß mit den Maßnahmen des Anspruchs 1 gelöst. Diese Maßnahmen sind darin zu sehen, daß die magnetfeldsensitive Sensoreinrichtung wenigstens eine Array-Anordnung mehrerer Sensoreinheiten in zumindest weitgehend planarem Aufbau enthält, wobei die Sensoreinheiten jeweils

- eine als symmetrisches Gradiometer gestaltete Flußantenne mit einem Mittelteil zur Magnetfelderfassung

und

- einen zugeordneten Flußspannungswandler mit zwei linearen Sensorelementen, die jeweils symmetrisch zu dem Mittelteil so angeordnet und so hintereinandergeschaltet sind, daß sich ihre durch die gradientenfreien Anteile des Magnetfeldes hervorgerufenen Spannungssignale zumindest weitgehend kompensieren,

aufweisen. Dabei sollen die Sensoreinheiten in mindestens zwei Gruppen unterschiedlicher Ausrichtung zur Erfassung unterschiedlich gerichteter Magnetfeldgradienten unterteilt sein.

Die mit dieser Ausgestaltung der Sensoreinrichtung verbundenen Vorteile sind insbesondere darin zu sehen, daß in jeder ihrer Sensoreinheiten eine hochauflösende Magnetfeldmessung bei verhältnismäßig hohem Störpegel zu gewährleisten ist. Dies ist in erster Linie auf die Verwendung von zwei Flußspannungswandlern pro Sensoreinheit in Form von linearen Sensorelementen statt von SQUIDs und deren Hintereinanderschaltung mit einer antiparallelen Felderfassung beidseitig an dem Mittelteil des Gradiometers zurückzuführen. Damit ist - im Gegensatz zum Stand der Technik gemäß der genannten Literaturstelle aus "Cryogenics" - eine Berücksichtigung des gradientenfreien Anteils des detektierten Magnetfeldes zumindest weitgehend durch Kompensation der diesbezüglichen Spannungssignale zu unterdrücken und praktisch nur eine Feldgradientendetektion zu erreichen. Die Unterteilung der Sensoreinheiten wird im allgemeinen so vorgenommen, daß die Sensoreinheiten der einen Gruppe zur Detektion von  $\partial B_z/\partial y$ -Magnetfeldgradienten und die Sensoreinheiten der anderen Gruppe zur Detektion von  $\partial B_z/\partial x$ -Magnetfeldgradienten vorgesehen sind.

Unter einem für eine erfindungsgemäße Sensoreinrichtung geeigneten linearen Sensorelement soll ein Sensorelement verstanden werden, das in einem zu berücksichtigenden Meßbereich ein der Feldstärke eines detektierten Magnetfeldes zumindest annähernd (d. h. mit einer Abweichung von unter 10%) linear proportionales Spannungssignal erzeugt. Bei einer Verwendung solcher Sensorelemente sind vorteilhaft sogenannte Fluxlocked-Loop-Regelschleifen nicht unbedingt erforderlich. Damit wird die benötigte Steuerelektronik entsprechend einfach. Falls unter extrem gestörten Bedingungen dennoch ein Regelkreis notwendig ist, so ist dieser verhältnismäßig einfach auszugestalten. Im Falle einer geplanten Kühlung der Flußantennen und der Sensorelemente werden deshalb auch nur wenige eine Wärmeinleitung in ein Kühlmedium verursachende Leitungen benötigt. Da die thermische Last begrenzt ist, können verhältnismäßig kleine Kryostatengefäße vorgesehen werden.

Bevorzugte Ausführungsformen solcher linearen Sensorelemente sind Hallsensorelemente oder magnetoresistive Sensorelemente. Als magnetoresistive Sensorelemente können insbesondere solche vorgesehen sein, die Dünnschichtsysteme mit erhöhtem magnetoresistiven Effekt sind.

Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen der erfindungsge-  
mäßigen Sensoreinrichtung gehen aus den Unteransprüchen hervor.

So ist es besonders vorteilhaft, wenn jede Flußantenne als eine Gradiometer-Dreifachschleife mit einer zwischen zwei äußeren Einzelschleifen befindlichen, von diesen jeweils beabstandeten mittleren Einzelschleife als dem Mittelteil gestaltet ist und wenn die jeder Flußantenne zugeordneten zwei linearen Sensorelemente in den Beabstandungen zwischen den äußeren Einzelschleifen und der mittleren Einzelschleife angeordnet sind. Damit lassen sich jede Flußantenne und ihre Sensorelemente in wenigen Schichten bzw. Schichtsystemen in Dünnschichttechnik aufbauen. Der herstellungsbedingte Aufwand für die Sensoreinrichtung ist dementsprechend gering. Außerdem können auf einfache Weise zueinander benachbarte Sensoreinheiten der Array-Anordnung an ihren einander zugewandten äußeren Einzelschleifen hintereinandergeschaltet werden.

Gegebenenfalls ist es jedoch auch möglich, jede Flußantenne als eine achtförmige Gradiometer-Doppelschleife mit einem gemeinsamen Mittelsteg als dem Mittelteil zu gestalten und die jeder Flußantenne zuzuordnenden zwei linearen Sensorelemente beidseitig längs des Mittelstegs anzuordnen. Ein entsprechendes Gradiometer ist Gegenstand der nicht-vorveröffentlichten DE-Patentanmeldung 199 44 586.9. Entsprechende Flußantennen haben in diesem Fall einen besonders einfachen Aufbau.

Ferner ist es besonders vorteilhaft, wenn als lineare Sensorelemente Hallsensorelemente vorgesehen werden. Da nämlich bei solchen Sensorelementen die Felderfassung senkrecht zur Fläche der Elemente erfolgt, können solche Elemente vorteilhaft in der Ebene der Flußantennen liegen. Dies ermöglicht einen besonders einfachen Aufbau der Sensoreinrichtung.

Außerdem ist es von Vorteil, wenn Hallsensorelemente vom 4-Kontakt-Typ vorgesehen sind. Solche Elemente können nämlich insbesondere derart bezüglich des Mittelteils der jeweiligen Flußantenne angeordnet sein, daß sie diesen Mittelteil als gemeinsame Kontaktfläche besitzen. Eine derartige Anordnung zeichnet sich durch einen besonders einfachen Aufbau aus.

Vorteilhaft können Hallsensorelemente aus einem insbesondere halbleitenden Material mit einem Hallkoeffizienten von mindestens  $100 \text{ cm}^3/\text{A} \cdot \text{s}$  gebildet sein. Die Verwendung entsprechender Materialien führt zu hohen Werten der zu gewinnenden Hallspannungen. Eine weitere diesbezügliche Verbesserung läßt sich dadurch erreichen, daß die Hallsensorelemente gekühlt werden. Dies ist insbesondere dann leicht vorzunehmen, wenn supraleitende Flußantennen vorgesehen werden.

Darüber hinaus ist für Hallsensorelemente vorteilhaft eine Streifenform zu wählen. Eine solche Form, bei der die Ausdehnung in der Hauptausdehnungsrichtung mindestens doppelt so groß wie in der Querrichtung sein soll, bringt eine hohes Hallsignal mit sich.

Für die Flußantennen der Sensoreinrichtung können prinzipiell alle elektrisch gut leitenden Materialien, seien es normalleitende oder supraleitende Materialien, verwendet werden. Besonders vorteilhaft kann ein oxidisches Hoch- $T_c$ -Supraleitermaterial vorgesehen sein. Aus einem dergleichen Material kann man nämlich durch Einstellung eines vorbestimmten Sauerstoffgehalts auch ein Material mit einem hinreichend großen Hallkoeffizienten ausbilden, so daß

dann im Fall einer Verwendung von Hallsensorelementen diese Elemente aus einem Material bestehen, das die metallischen Komponenten des Hoch- $T_c$ -Supraleitermaterials sowie einen vorbestimmten Anteil der Sauerstoffkomponente aufweist.

Vorteilhaft werden alle Sensoreinheiten auf einem gemeinsamen Substrat angeordnet. Dies bringt eine entsprechend einfache Herstellungstechnik sowie eine Begrenzung der erforderlichen Verbindungsleitungen zwischen den Sensoreinheiten mit sich. Gegebenenfalls ist es jedoch auch möglich, daß jede Gruppe der Sensoreinheiten auf einem eigenen Substrat angeordnet wird. Beispielsweise können diese Substrate der Gruppen z. B. mittels einer gemeinsamen Trägerstruktur auf verschiedene Flächen angeordnet sein. Dabei ist immer unter einem Substrat auch eine als Substrat dienende Fläche oder Flachseite einer Trägerstruktur zu verstehen.

Als besonders vorteilhaft ist es anzusehen, daß zumindest einige der, vorzugsweise alle Sensorelemente für einen gemeinsamen Einstellstrom elektrisch hintereinandergeschaltet sind. Damit kommt man mit einem Minimum an Stromversorgungsleitungen aus. Dies ist insbesondere dann wichtig, wenn eine Kühlung vorgesehen werden soll und die Wärmeleitungsverluste in das erforderliche Kühlmedium zu begrenzen sind.

Bei einer gemeinsamen Kühlung der Flußantennen und der Sensorelemente in einem Kaltbereich und bei in einen Warmbereich führenden Anschlüssen kann vorteilhaft zu einem elektrischen Anschluß der Array-Anordnung ein Flachbandkabel vorgesehen werden, das sich von dem Warmbereich in den Kaltbereich erstreckt. Dabei ist es besonders günstig, wenn in dem Kaltbereich ein Wechselstromtransformator mit kleinerer Windungszahl auf der Anschlußseite der Sensorelemente als auf der Seite einer externen Stromversorgung in dem Warmbereich vorgesehen wird. Wegen der größeren Windungszahl auf der dem Warmbereich zugewandten Seite lassen sich geringere Leiterquerschnitte vorsehen, die entsprechend geringere Wärmeeinleitungsverluste in den Kaltbereich mit sich bringen.

Für eine Sensoreinrichtung mit zu kühlenden Flußantennen kann vorteilhaft ein Kryostatengehäuse vorgesehen werden, das eine Bewandung in geringem Abstand von unter 1 cm von der Array-Anordnung aufweist. Das Kryostatengehäuse erfordert so wenig Raumbedarf und kann nah an der zu detektierenden Feldquelle angeordnet werden. Restfelder im Kryostatenmaterial bedingen deshalb auch keine wesentliche Änderung der Sensorempfindlichkeit.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand der Zeichnung noch weiter erläutert. Dabei zeigen jeweils schematisch deren

Fig. 1 eine bevorzugte Ausführungsform einer Sensoreinheit für eine Sensoreinrichtung nach der Erfindung.

Fig. 2 eine Verschaltungsmöglichkeit mehrerer solcher Sensoreinheiten nach Fig. 1,

Fig. 3 eine Array-Anordnung von Sensoreinheiten,

Fig. 4 und 5 einen elektrischen Anschluß der Array-Anordnung nach Fig. 3,

Fig. 6 eine AC-Stromversorgung der Array-Anordnung nach Fig. 3,

Fig. 7 und 8 Ausführungsformen einer Spannungsauslese von Sensoreinheiten,

Fig. 9 und 10 Ausführungsformen einer Signalverarbeitung an einer Sensoreinheit,

Fig. 11 die Unterbringung einer Array-Anordnung in einem Kryostatengefäß und

Fig. 12 mehrere, ein Vektor-Magnetometer bildende Array-Anordnungen von Sensoreinheiten.

Dabei sind in den Figuren sich entsprechende Teile mit

denselben Bezugszeichen versehen.

Fig. 1 zeigt in Aufsicht mit nicht-maßstabgetreuen Abmessungen eine einzelne Sensoreinheit 2 einer Sensoreinrichtung nach der Erfindung. Diese Sensoreinheit ist neben weiteren solcher Einheiten nach bekannten Verfahren in Dünnschichttechnik auf einem Substrat 3 aus nicht-magnetischem Material zu erstellen. Sie umfaßt als eine Flußantenne aus einem elektrisch gut leitenden Material eine Dreifachschleife 4 aus drei in sich geschlossenen, rechteckförmigen Einzelschleifen 4a bis 4c oder aus entsprechenden Flächen mit Innenlochöffnungen. Die beiden äußeren Einzelschleifen 4a und 4c sind gegenüber der zwischen ihnen liegenden mittleren Einzelschleife 4b jeweils durch einen schmalen Spalt bzw. eine entsprechende Beabstandung 5a bzw. 5b getrennt. In diesen Beabstandungen ist jeweils als ein linearer Flußspannungswandler gemäß dem ausgewählten Ausführungsbeispiel ein vorzugsweise streifenförmiges Hallensorelement 6 bzw. 7 angeordnet; insbesondere werden die Beabstandungen von diesen Elementen überbrückt. Dabei sind die seitlichen Ränder des Hallensorelementes 6 mit der linken äußeren Einzelschleife 4a und der mittleren Einzelschleife 4b kontaktiert, während in entsprechender Weise das Hallensorelement 7 mit der rechten äußeren Einzelschleife 4c und der mittleren Einzelschleife 4b verbunden ist. Die Hallensorelemente können dabei jeweils in den Kontaktbereichen die Einzelschleifen geringfügig überlappen oder auch an diese Schleifen angrenzen.

Die Hallensorelemente 6 und 7 können in Dünnschicht- bzw. Dünnschichttechnik mit einem für solche galvanomagnetischen Bauelemente typischen Material aufgebaut sein. Entsprechende, auch als Hallgeneratoren bezeichnete Hallensorelemente und deren Funktionsweise sind allgemein bekannt (vgl. z. B. das Buch von H. Reichl u. a. mit dem Titel "Halbleitersensoren", Expert-Verlag, Ehningen (DE), 1989, insbesondere Seiten 243 bis 267, oder das Buch von U. von Borcke mit dem Titel "Feldplatten und Hallgeneratoren", Verlag der Siemens Aktiengesellschaft, Berlin u. a., 1985, insbesondere Seiten 30 und 76 bis 87). Beispiele solcher Materialien sind Bi, InAs oder InAsP. Auch Materialien auf Basis von Hoch  $T_c$ -Supraleitermaterialien, die gegenüber diesen Supraleitermaterialien aufgrund einer Sauerstoffarmut halbleitend sind, können verwendet werden. So ist z. B. an sauerstoffarmem Y-Ba-Cu-O-Material ein hinreichend großer Hallkoeffizient zu beobachten. Die Hallensorelemente 6 und 7 sind vorzugsweise vom sogenannten Vier-Kontakt-Typ in Rechteckform (vgl. z. B. das genannte Buch von U. von Borcke, Seiten 23 bis 30) und vorzugsweise als schmale Streifen ausgeführt.

Über die Einzelschleifen 4a bis 4c und die Hallensorelemente 6 und 7 wird ein Einstell- oder Biasstrom  $I_B$  an Stromanschlüssen 8a und 8b zu- bzw. abgeführt. Zur Abnahme der an den Hallensorelementen hervorgerufenen Hallspannungen sind diese Elemente an einer Seite über einen streifenförmigen Verbindungsleiter 9 in Kontaktbereichen 6b und 7a derart elektrisch in Reihe geschaltet, daß sich die Anteile ihrer Hallspannungen, die durch die gradientenfreien Anteile des detektierten Magnetfeldes bzw. Störfeldes hervorgerufen sind, zumindest weitgehend, d. h. zu mehr als 90%, kompensieren. Die Komponenten  $E_{H1}$  und  $E_{H2}$  weisen in die gleiche Richtung. Bei einem gradientenfreien Feld sind nämlich  $E_{H1}$  und  $E_{H2}$  gleich in Amplitude und Richtung. Die Folge davon ist, daß für diesen Fall  $V_H = V_{H1} - V_{H2} \approx 0$  gilt. Dabei sind  $V_{H1}$  und  $V_{H2}$  die Hallspannungen an den einzelnen Hallensorelementen 6 bzw. 7 und  $V_H$  die resultierende (Gesamt-)Hallspannung. Die bzgl. des Verbindungsleiters 9 gegenüberliegenden Enden der Hallensorelemente sind in Kontaktbereichen 6a und 7b mit Kontaktflächen 10a bzw. 10b verbunden, die als Abgriffe für

die gesamte Hallspannung  $V_H$  dienen. Somit ist die Netto-Hallspannung proportional dem Feldgradienten über der Flußantenne und ist eine praktisch reine Magnetfeldgradienten-Detektion eines magnetischen Feldes mit hoher Magnetfeldgradientenauflösung auch bei verhältnismäßig hohem Störpegel zu gewährleisten.

Bei dem vorstehenden Ausführungsbeispiel wurde davon ausgegangen, daß auch für die Hallensorelemente ein Bi-Material gewählt wird. Eine weitere Verbesserung ist zu erreichen, wenn man statt dessen andere Materialien für die Hallensorelemente wählt, die einen größeren Hallkoeffizienten besitzen. Entsprechende Materialien sind dem vorgenannten Buch von U. von Borcke, Seite 30, zu entnehmen. So hat z. B. InAs einen Hallkoeffizienten von etwa  $100 \text{ cm}^3/\text{A} \cdot \text{s}$  und InAsP einen von  $200 \text{ cm}^3/\text{A} \cdot \text{s}$  bei Raumtemperatur. Durch Abkühlung der Hallensorelemente, insbesondere bei Verwendung von einer Gradiometerschleife mit supraleitendem Material, ergeben sich noch größere Hallkoeffizienten.

Bei Verwendung eines Hallsensormaterials auf Basis der Komponenten eines für die Gradiometer-Dreifachschleife verwendeten Hoch- $T_c$ -Supraleitermaterials besteht die Möglichkeit, den Sauerstoffgehalt gegenüber dem Supraleitermaterial so einzustellen, daß ein verhältnismäßig hoher Hallkoeffizient zu erreichen ist. Entsprechende Maßnahmen haben zusätzlich den Vorteil, daß man die Gegeninduktivität zwischen den Hallensorelementen und den ihnen jeweils zugeordneten Einzelschleifen auch noch weiter optimieren kann.

Zweckmäßig wird für die Einzelschleifen 4a bis 4c, für den Verbindungsleiter 9 sowie für die Kontaktflächen 10a und 10b dasselbe Material vorgesehen, so daß diese Teile in einer ersten Ebene liegend ausgebildet werden können. In einer zweiten Ebene liegen dann die Hallensorelemente 6 und 7.

Eine entsprechende Sensoreinheit 2 läßt sich neben weiteren solcher Einheiten beispielsweise dadurch herstellen, daß man auf einem für ein Hoch- $T_c$ -Supraleitermaterial wie Y-Ba-Cu-O geeignete Substrat, beispielsweise aus Glas, eine Schicht des Supraleitermaterials und anschließend in-situ eine Schutzschicht aus  $\text{SrTiO}_3$  oder aus Au aufbringt. Als Abscheidungsverfahren kann beispielsweise eine gepulste Laser-Depositionstechnik (PLD) gewählt werden. Anschließend wird dieser Aufbau mittels Photolithographie und Ionenstrahlätzung zu der Dreifachschleife 4, dem Verbindungsleiter 9 und den Kontaktflächen 10a und 10b strukturiert. Im Bereich der Beabstandungen 5a und 5b wird dann eine Schicht z. B. aus halbleitendem Bi mittels Elektronenstrahl- oder thermischen Verdampfens aufgebracht. Diese halbleitende Schicht wird anschließend zu den beiden Hallensorelementen 6 und 7 strukturiert.

Da insbesondere Hallensorelemente lineare Sensorelemente sind, können mit ihnen vorteilhaft Sensorarrays aufgebaut werden, die nur mit einem gemeinsamen Einstellstrom  $I_B$  seriell versorgt werden. Die den Einstellstrom führenden Teile der Flußantenne kann man dann komplett supraleitend ausführen, so daß ohmsche Verluste nicht auftreten. Dies ist insofern wichtig, da die Empfindlichkeit der Sensoreinrichtungen proportional mit dem Einstellstrom zunimmt. Darüber hinaus ist durch eine effiziente Kühlung ein größerer Einstellstrom durch die einzelnen Hallensorelemente zu leiten als es bei Raumtemperatur wegen dann auftretender Aufheizeffekte möglich wäre.

Bei dem vorstehend dargestellten Ausführungsbeispiel wurde davon ausgegangen, daß als linearer Flußspannungswandler Hallensorelemente vorgesehen sind. Neben solchen Elementen sind für die erfindungsgemäße Sensoreinrichtung jedoch auch andere magnetfeldempfindliche Sen-

sorelemente geeignet, die eine lineare Charakteristik zeigen. So können insbesondere magnetoresistive Dünnsensorsorelemente eingesetzt werden. Bei entsprechenden Sensorelementen kann es sich dabei zum einen um solche vom sogenannten "AMR-Typ" oder zum anderen um solche vom "GMR- oder vom TMR- oder vom CMR- oder vom GMI-Typ" handeln, die gegenüber AMR-Typ-Elementen einen vergleichsweise erhöhten magnetoresistiven Effekt zeigen. Diese unter der Bezeichnung "XMR-Technologie" zusammengefaßten Typen sind beispielsweise aus der Veröffentlichung "XMR-Technologien" des VDI-Technologiezeentrums "Physikalische Technologien", Düsseldorf, August 1997 zu entnehmen.

Fig. 2 zeigt ebenfalls als Aufsicht in stark schematisierter Darstellung eine entsprechende Ausführungsform einer Reihenschaltung 12 mehrere Sensoreinheiten  $S_i$ , die Teil einer Array-Anordnung einer erfindungsgemäßen Sensoreinrichtung sein können. Diese Reihenschaltung weist  $n = 4$  Unter-einheiten  $S_i$  (mit  $1 \leq i \leq n$ ) auf, die jeweils aus einer Sensoreinheit 2 nach Fig. 1 bestehen. Diese Sensoreinheiten  $S_1$  bis  $S_4$  sind so in Führungsrichtung des Einstellstromes  $I_B$  hintereinandergeschaltet, daß benachbarte äußere Einzelschleifen 4c und 4a jeweils über streifenförmige Verbindungsleiter 13 miteinander verbunden sind. Die an den einzelnen Sensoreinrichtungen abnehmbaren Gesamthallspannungen sind hier mit  $V_1$  bis  $V_4$  bezeichnet.

Aus Fig. 3 geht eine Array-Anordnung 20 einer erfindungsgemäßen Sensoreinrichtung hervor. Die in Aufsicht wiedergegebene Array-Anordnung umfaßt mehrere, hier z. B. in zwei Gruppen G1 und G2 unterteilte Sensoreinheiten  $S_i$  (mit  $1 \leq i \leq n$ ), wobei  $n$  die Gesamtzahl der einzelnen Sensoreinheiten ist. Gemäß dem stark schematisiert dargestellten Ausführungsbeispiel weist die erste Gruppe G1 neun Sensoreinheiten  $S_1$  bis  $S_6$  und  $S_{11}$  bis  $S_{13}$  auf. Dabei sind je drei Sensoreinheiten quasi in parallelen Zeilen angeordnet. Zwischen zwei dieser Zeilen liegt eine weitere Zeile mit beispielsweise vier Sensoreinheiten  $S_7$  bis  $S_{10}$ , die der zweiten Gruppe G2 zugehören. Mit den Sensoreinheiten der beiden Gruppen werden unterschiedlich ausgerichtete Magnetfeldgradienten detektiert. Hierzu müssen die Sensoreinheiten der beiden Gruppen entsprechend unterschiedlich ausgerichtet sein. So werden beispielsweise mit den Sensoreinheiten der Gruppe G1 nur  $\partial B_z / \partial y$ -Magnetfeldgradienten detektiert, während die Sensoreinheiten der anderen Gruppe G2 zur Detektion von  $\partial B_z / \partial x$ -Magnetfeldgradienten dienen. Dabei wird der Array-Anordnung ein x-y-z-Koordinatensystem zugrundegelegt.

Alle Sensoreinheiten  $S_i$  sind elektrisch hintereinandergeschaltet gemäß Fig. 2. Über sie wird deshalb ein Einstellstrom  $I_B$  geführt, der nur zwei Stromanschlüsse 8a und 8b erfordert. Außerdem sind für jede Sensoreinheit  $S_i$  zwei Leitungen zur Abnahme der jeweiligen Hallspannung  $V_i$  (mit  $1 \leq i \leq n$ ) vorzusehen. Alle Stromleitungen werden vorteilhaft an eine gemeinsame Seite der Array-Anordnung 20 bzw. eines sie tragenden Substrates geführt.

Zur Herstellung einer entsprechenden Array-Anordnung wird als Unterlage ein entsprechend großes, beispielsweise monokristallines und epitaxiales Substrat wie z. B. aus  $\text{SrTiO}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oder  $\text{LaAlO}_3$  mit kreisrundem oder rechteckigem Querschnitt und ebener oder gekrümmter Gestalt vorgesehen. Die Oberfläche dieses Substrates wird großflächig mit einem Hoch- $T_c$ -Supraleitermaterial wie z. B. vom Typ  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  (sogenanntes YBCO) und gegebenenfalls in-situ mit einer Schutzschicht beispielsweise aus Au oder  $\text{SrTiO}_3$  mittels eines PVD (Physical Vapor Deposition)-Verfahrens wie z. B. durch Laserablation beschichtet. Anschließend werden über Fototechnik und Ionenstrahlätzen die Strukturen für die Flußantennen ausgebildet. Dar-

auffolgend wird eine Beschichtung mit dem Material der Hallsensorelemente, beispielsweise einem halbleitenden Material vorgenommen. Daran schließt sich eine Strukturierung zu diesen Elementen beispielsweise durch eine Lift-Off-Technik oder ein Ätzverfahren an.

Die Array-Anordnung 20 gemäß Fig. 3, die auch auf mehreren Substraten 3 ausgebildet sein kann, wird anschließend gemäß der Aufsicht der Fig. 4 auf einem Träger (bzw. einer Trägerstruktur) 22 montiert. Der Träger ist auf einer Seite mit mindestens einer Steckerleiste 23 versehen. Die elektrische Verbindung zwischen dieser Steckerleiste und der Array-Anordnung erfolgt durch Drahtbonden.

Wie aus der Seitenansicht der Fig. 5 hervorgeht, ist die Steckerleiste 23 beispielsweise mit einem flexiblen Flachbandkabel 24 verbunden, über welches ein elektrischer Anschluß mit einer in der Figur nicht ausgeführten Elektronik erfolgt. Von dieser Elektronik ist lediglich eine Anschlußleiste 25 ersichtlich. Bei einer eventuell erforderlichen Kühlung der Array-Anordnung 20 erfolgt der Temperaturübergang zwischen einem Warmbereich W z. B. auf Raumtemperatur mit der Anschlußleiste 25 und einem Kaltbereich K eines Kühlmittels wie z. B.  $\text{LN}_2$  oder LHe mit der Steckerleiste 23 über das Flachbandkabel 24. Dabei sind die Leiterquerschnitte des Flachbandkabels so konzipiert, daß eine möglichst geringe Wärmeableitung in den Kaltbereich K des Kühlmittels erfolgt. Dies ist vorzugsweise dadurch zu erreichen, daß man als flexibles Flachbandkabel 24 eine flexible Kunststoffolie oder -platte verwendet, auf der die erforderlichen Leiterbahnen auslatte verwendet, auf der die erforderlichen Leiterbahnen ausgebildet sind. Dabei ist es besonders vorteilhaft, daß sämtliche Sensoreinheiten von einer gemeinsamen Stromquelle über nur zwei Leitungen mit dem Einstellstrom  $I_B$  versorgt werden müssen. In der Figur ist ein entsprechender Warm-Kalt-Übergang durch eine gestrichelte Linie 26 angedeutet.

Im Hinblick auf eine hohe Feldauflösung kann es erforderlich werden, daß die Hallsensorelemente der Array-Anordnung 20 mit einem verhältnismäßig hohen Einstellstrom  $I_B$  z. B. von mehreren Milliampere versorgt werden müssen. Dann müssen die hierfür vorzusehenden elektrischen Leiter z. B. des Flachbandkabels 24 dementsprechend große Leiterquerschnitte aufweisen, die zu entsprechenden Wärmeableitungsverlusten in den Kaltbereich K der Array-Anordnung führen können. In diesem Falle läßt sich vorteilhaft eine Wechselstromversorgung für die Array-Anordnung vorsehen. Fig. 6 zeigt ein entsprechendes Ausführungsbeispiel in Schrägansicht. Eine Wechselstromversorgung ermöglicht nämlich die Verwendung eines Transformators 28 im Kaltbereich K, der auf seiner in den raumtemperaturseitigen Warmbereich W führenden Versorgungsseite mit vielen Windungen  $w_1$  ausgestattet sein kann. Diese Windungen ermöglichen dann dementsprechend geringe Leiterquerschnitte. Auf der Anschlußseite zu der Array-Anordnung können dann wenige Windungen  $w_2$  mit größerem Querschnitt vorgesehen werden, um die höheren Ströme zu führen.

Gemäß dem in Fig. 7 angedeuteten Prinzipschaltbild eines Teils einer Array-Anordnung kann vorteilhaft die Spannungsauslese der einzelnen Sensoreinheiten  $S_i$  jeweils über einen Differentialverstärker 30, mit hochohmigem Eingang erfolgen. Dies erfordert für den Fall einer Kühlung der Array-Anordnung zwei Kaltleitungen 31a, 31b pro Sensoreinheit  $S_i$ . In den Fällen, z. B. bei einer sehr großen Array-Anordnung, wo dies aus kühlechnischen Gründen ein Problem ist, kann vorteilhaft statt einer Gleichstromversorgung (DC-Versorgung) eine Wechselstromversorgung (AC-Versorgung) vorgesehen werden. In Fig. 8 ist in Fig. 7 entsprechender Darstellung ein Ausführungsbeispiel angedeutet.

Hier wird die von der Sensoreinheit  $S_i$  erzeugte Sensorspannung  $V_i$  bzw. Hallspannung mit einem kalten Resonanzkreis 32<sub>i</sub> auf der Frequenz des Einstellstromes  $I_B$  ausgelesen. Ein derartiger Resonanzkreis erfordert nur eine in den Warmbereich führende Ausleseleitung 33<sub>i</sub>, da die andere im Kaltbereich K auf Erdpotential, auf dem sich z. B. das Gehäuse eines erforderlichen Kryostaten befindet, gelegt werden kann. Auf diese Weise läßt sich die Zahl der kalten Ausleseleitungen gegenüber der Ausführungsform nach Fig. 7 um den Faktor 2 reduzieren.

In Fig. 9 sind alternativ weitere Teile einer signalverarbeitenden Elektronik für die Ausführungsformen nach den Fig. 7 und 8 für eine Sensoreinheit  $S_i$  alternativ angedeutet. Die Signalverarbeitungskette nach dem Verstärker 30<sub>i</sub> bei einer DC-Stromversorgung besteht aus einer Filterstufe 35, einem A/D-Wandler 36 und einer Rechneinheit 37. Bei der für dieselbe Sensoreinheit gezeigten alternativen AC-Stromversorgung wird das amplitudenmodulierte Signal nach dem Resonanzkreis 32<sub>i</sub> in einem Verstärker 38 verstärkt und anschließend phasempfindlich demoduliert, bevor es wie im Falle der DC-Stromversorgung digitalisiert wird. Zur phasempfindlichen Demodulation sind ein Bandfilter 39 und ein auf die AC-Frequenz  $\omega$  bezogener Multiplizierer oder Gleichrichter 40 vorgesehen.

Für die Fälle, z. B. bei einer kleinflächigen Array-Anordnung oder bei extremem Störsignalpegel, in denen ein Sensorbetrieb in einem bestimmten Einstellpunkt bezüglich eines Stromes und/oder bzgl. eines Feldes unbedingt erforderlich wird, können gegebenenfalls nach der jeweiligen Filterstufe der in Fig. 9 alternativ aufgezeigten beiden Signalverarbeitungsmöglichkeiten noch Rückkopplungen zu den Sensoreinheiten vorgesehen werden. Fig. 10 zeigt ein entsprechendes Ausführungsbeispiel für die in Fig. 9 gezeigte alternative Signalauslese. Die jeweilige Rückkopplung mit Leitungen 42 bzw. 43 weist üblicherweise eine Serienschaltung von einem nur ohmsche Verluste erzeugenden Glied 44 bzw. 45 und einer Rückkopplungsspule 46 bzw. 47 auf. Die Spule ist dabei magnetisch induktiv an die jeweilige Sensoreinheit bzw. deren Flußantenne gekoppelt. Auf diese Weise ist am Ort der Flußantenne ein lokales Feld zu generieren, das unerwünschten Meß- oder Störfeldern entgegenwirkt.

Ein Offset-Abgleich eines jeder Sensoreinheit zugeordneten Vorverstärkers (30<sub>i</sub>, 38) ist mit einer üblichen Potentiometerschaltung vornehmbar. Gegebenenfalls kann diese auch dazu genutzt werden, einen Offset der Sensoreinheit einschließlich ihres Vorverstärkers abzugleichen. Drift-Erscheinungen, insofern diese in Differentialverstärkern noch eine Rolle spielen, lassen sich entweder mit einer Temperaturstabilisierung oder mittels Einsatzes einer AC-Stromversorgung entgegenwirken.

In Fig. 11 ist ein Querschnitt durch ein für eine Array-Anordnung einer erfindungsgemäßen Sensoreinrichtung besonders geeignetes Kryostatengefäß 50 angedeutet. Dieses zur Aufnahme eines Kühlmediums M in einem Kaltbereich K vorgesehene Gefäß ist dabei so gestaltet, daß z. B. eine Array-Anordnung 20 gemäß Fig. 5 möglichst nahe, vorzugsweise näher als 1 cm, an eine zu detektierende Magnetfeldquelle herangebracht werden kann. Dazu sind zum einen die von einem Träger 22 in dem Kaltbereich K gehaltenen, auf einem Substrat ausgebildeten Sensoreinheiten von der Bewandung 51 des Kryostatengefäßes 50 vorteilhaft in einem entsprechend geringen Abstand a von beispielsweise zwischen 2 und 10 mm anzuordnen; zum anderen läßt sich diese Bewandung dünn ausgestalten. In der Figur sind ferner mitgeköhlte passive Komponenten 52 auf der Rückseite des Trägers 22 nur angedeutet. Besonders für niederfrequente Signale mit einer Frequenz unter 10 kHz eignet sich ein doppelwandiges Gefäß aus rostfreiem Stahl, das eine Warm-

Kalt-Distanz von etwa 3 mm erlaubt. Für höherfrequente Signale wird beispielsweise ein vergleichsweise schlechter leitendes Material für das Gefäß, z. B. ein Kunststoff, vorgesehen. Die konkrete Ausgestaltung des Kryostatengefäßes hängt von den spezifischen Anwendungen ab. So wäre z. B. für die Kardiographie eine flache Array-Anordnung 20 mit einer Fläche von etwa 20 cm x 30 cm erforderlich. Eine flache Bewandung 51 eines entsprechenden Kryostatengefäßes 50 hätte dann etwa dieselben Abmessungen. Für einen Einsatz zur Prüfung von Platinen kann ebenfalls eine flache Array-Anordnung vorgesehen werden, deren Abmessungen an die der zu prüfenden Platine angepaßt sind. Für eine Prüfung von gekrümmten Flächen in Großgeräten, z. B. zur Prüfung von Turbinenschaufeln von Dampfturbinen oder von Rohrleitungen, wird eine Array-Anordnung mit einer Flächenkrümmung erforderlich, die an die Krümmung des zu prüfenden Teils angepaßt ist. Dementsprechend wird auch ein gekrümmtes Kryostatengefäß vorgesehen.

Falls nur kleine Flächen auf kleine Fehler geprüft werden müßten, kann eine Array-Anordnung auf wenige Sensoreinheiten reduziert werden, um damit räumlich aufgelöst nahe an der Signalquelle eine Prüfung zu ermöglichen.

Bei den vorstehenden Ausführungsbeispielen wurde davon ausgegangen, daß mit zwei Gruppen von Sensoreinheiten mit unterschiedlicher Ausrichtung unterschiedliche Magnetfeldgradienten erfaßt werden. Gegebenenfalls sind jedoch mit solchen Array-Anordnungen von Sensoreinheiten auch mindestens drei Gruppen zu bilden, wenn es um die Erfassung einer räumlichen, vektoriellen Feldverteilung geht. Ein spezielles Ausführungsbeispiel eines entsprechenden Vektor-Magnetometers ist in Fig. 12 in Schrägansicht angedeutet.

Das mit 60 bezeichnete Magnetometer enthält eine Trägerstruktur 61, die insbesondere die Gestalt eines Würfels oder eines Quaders hat. Die sechs beispielsweise gleichgroßen Flachseiten der Trägerstruktur sind mit 61a bis 61f bezeichnet und dienen jeweils als Substrat für eine planare Array-Anordnung von zwei Gruppen zuordbaren Sensoreinheiten z. B. gemäß Fig. 3. Ebenso gut können aber auch auf der Trägerstruktur besondere, die Array-Anordnungen jeweils tragende Substrate gemäß Fig. 4 angeordnet sein.

In Fig. 12 sind aus Gründen der Übersichtlichkeit lediglich von den einzelnen Array-Anordnungen jeweils nur eine einzige Sensoreinheit  $S_i$  oder  $S'_i$  (mit  $i = a, b$  oder  $c$ ) angedeutet, obwohl zu jeder Array-Anordnung gemäß Fig. 3 auch dazu senkrecht ausgerichtete, einer weiteren Gruppe zuzuordnende Sensoreinheiten gehören. D. h., auf jeder der Flachseiten 61a bis 61f befinden sich Sensoreinheiten zweier Gruppen, wobei die Sensoreinheiten auf parallelen, gegenüberliegenden Flachseiten jeweils zur Erfassung derselben Magnetfeldgradienten vorgesehen sind. In der Figur sind aus Vereinfachungsgründen die beiden Gruppen auf jeweils parallel zueinander liegenden Flachseiten einheitlich mit  $G_j$  bzw.  $G'_j$  (mit  $j = 1, 2$  oder  $3$ ) bezeichnet. Dabei ist mit der Bezeichnung  $G_j$ ,  $G'_j$  berücksichtigt, daß parallel liegende Array-Anordnungen zwar zur selben Gruppe mit dem Index  $j$  gehören, sich jedoch auf verschiedenen Flachseiten der würfelförmigen Trägerstruktur befinden. In der Schrägansicht der Figur sind ferner die Bezugszeichen von verdeckten Flachseiten in Klammern gesetzt und die auf diesen verdeckten Flachseiten befindlichen Sensoreinheiten gestrichelt eingezeichnet.

Dementsprechend sind bei dem in Fig. 12 angedeuteten Vektor-Magnetometer 60 z. B. mit den auf den gegenüberliegenden Flachseiten 61a und 61b befindlichen Array-Anordnungen einer Gruppe  $G_1$  bzw.  $G'_1$  jeweils  $\partial B_x / \partial x$ - und  $\partial B_x / \partial y$ -Magnetfeldgradienten zu erfassen. Von diesen Array-Anordnungen sind lediglich die Sensoreinheiten  $S_a$  und



$S_a'$  aus der Gruppe G1, G1' ersichtlich, die zur Erfassung der  $\partial B_z/\partial x$ -Magnetfeldgradienten vorgesehen sind. In entsprechender Weise können mit den zu einer Gruppe G2, G2' gehörenden Array-Anordnungen auf den Flachseiten 61c und 61d  $\partial B_x/\partial y$ - und  $\partial B_x/\partial z$ -Magnetfeldgradienten detektiert werden. Von diesen Array-Anordnungen sind lediglich die Sensoreinheiten  $S_b$  und  $S_b'$  für die  $\partial B_x/\partial y$ -Magnetfeldgradientenerfassung angedeutet. Die in Array-Anordnungen auf den Flachseiten 61e und 61f befindlichen, zu einer Gruppe G3, G3' gehörenden Sensoreinheiten  $S_c$  und  $S_c'$  erfassen dann  $\partial B_y/\partial x$ -Magnetfeldgradienten. Die ferner  $\partial B_y/\partial z$ -Magnetfeldgradienten detektierenden Sensoreinheiten dieser letztgenannten Array-Anordnungen sind in der Figur nicht angedeutet.

Mit einer Fig. 12 entsprechenden Ausbildung eines Vektor-Magnetometers 60 ist dann vorteilhaft eine räumliche, vektorielle Feldverteilung eines im Volumen des Magnetometers vorhandenen Magnetfeldes in x-, y- und z-Richtung gemäß dem eingezeichneten Koordinatensystem erfassbar.

#### Patentansprüche

1. Magnetfeldsensitive Sensoreinrichtung mit wenigstens einer Array-Anordnung (20) mehrerer Sensoreinheiten (2;  $S_i$ ) in zumindest weitgehend planarem Aufbau, welche Sensoreinheiten jeweils
  - eine als symmetrisches Gradiometer gestaltete Flußantenne mit einem Mittelteil zur Magnetfeld-erfassung und
  - einen zugeordneten Flußspannungswandler mit zwei linearen Sensorelementen (6, 7), die jeweils symmetrisch zu dem Mittelteil der Flußantenne so angeordnet und so hintereinandergeschaltet sind, daß sich ihre durch die gradientenfreien Anteile des Magnetfeldes hervorgerufenen Spannungssignale zumindest weitgehend kompensieren,
 aufweisen, wobei die Sensoreinheiten (2;  $S_i$ ) in mindestens zwei Gruppen (G2, G1) unterschiedlicher Ausrichtung zur Erfassung unterschiedlich gerichteter Magnetfeldgradienten ( $\partial B_z/\partial x$ ,  $\partial B_z/\partial y$ ) unterteilt sind.
2. Sensoreinrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß jede Flußantenne als eine Gradiometer-Dreifachschleife (4) mit einer zwischen zwei äußeren Einzelschleifen (4a, 4c) befindlichen, von diesen jeweils beabstandeten mittleren Einzelschleife (4b) als dem Mittelteil gestaltet ist und daß die jeder Flußantenne zugeordneten zwei linearen Sensorelemente (6, 7) in den Beabstandungen (5a, 5b) zwischen den äußeren Einzelschleifen (4a, 4c) und der mittleren Einzelschleife (4b) angeordnet sind.
3. Sensoreinrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß jede Flußantenne als eine achtförmige Gradiometer-Doppelschleife mit einem gemeinsamen Mittelsteg als dem Mittelteil gestaltet ist und daß die jeder Flußantenne zugeordneten zwei linearen Sensorelemente (6, 7) beidseitig längs des Mittelstegs angeordnet sind.
4. Sensoreinrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß jede Gruppe (G1, G2) der Sensoreinheiten ( $S_i$ ) auf einem eigenen Substrat (3) angeordnet ist.
5. Sensoreinrichtung nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Substrate der Gruppen auf verschiedenen Flächen angeordnet sind.
6. Sensoreinrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß alle Sensoreinheiten (2;  $S_i$ ) auf einem gemeinsamen Substrat (3) angeordnet sind.

7. Sensoreinrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zumindest einige der, vorzugsweise alle Sensorelemente (6, 7) für einen gemeinsamen Einstellstrom ( $I_B$ ) elektrisch hintereinandergeschaltet sind.
8. Sensoreinrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Sensorelemente (6, 7) den Mittelteil als gemeinsames Kontaktelement besitzen.
9. Sensoreinrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß Verbindungsleiter (9) und Kontaktflächen (10a, 10b) der linearen Sensorelemente (6, 7) aus dem Material der Flußantenne gebildet sind.
10. Sensoreinrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die linearen Sensorelemente (6, 7) Hallensorelemente sind.
11. Sensoreinrichtung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Hallensorelemente (6, 7) vom 4-Kontakt-Typ sind.
12. Sensoreinrichtung nach Anspruch 10 oder 11, gekennzeichnet durch Hallensorelemente (6, 7) in Streifenform.
13. Sensoreinrichtung nach einem der Ansprüche 10 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß die Hallensorelemente (6, 7) auf Basis eines Hoch- $T_c$ -Supraleitermaterials mit demgegenüber verschiedener Stöchiometrie ausgebildet sind.
14. Sensoreinrichtung nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß sich das Material der Hallensorelemente (6, 7) bezüglich des Anteils der Sauerstoffkomponente von dem Hoch- $T_c$ -Supraleitermaterial unterscheidet.
15. Sensoreinrichtung nach einem der Ansprüche 10 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß die Hallensorelemente (6, 7) aus einem halbleitenden Material mit einem Hallkoeffizienten von mindestens  $100 \text{ cm}^3/\text{A} \cdot \text{s}$  gebildet sind.
16. Sensoreinrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß die linearen Sensorelemente magnetoresistive Sensorelemente sind.
17. Sensoreinrichtung nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, daß die magnetoresistiven Sensorelemente Dünnschichtensysteme mit erhöhtem magnetoresistiven Effekt sind.
18. Sensoreinrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Flußantennen aus elektrisch normalleitendem Material bestehen.
19. Sensoreinrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 17, dadurch gekennzeichnet, daß die Flußantennen aus supraleitendem Material bestehen.
20. Sensoreinrichtung nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, daß das supraleitende Material ein oxidisches Hoch- $T_c$ -Supraleitermaterial ist.
21. Sensoreinrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch eine gemeinsame Kühlung der Flußantennen und der Sensorelemente (6, 7) in einem Kaltbereich (K) und durch in einen Warmbereich (W) führende Anschlüsse.
22. Sensoreinrichtung nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, daß zu einem elektrischen Anschluß der Array-Anordnung (20) ein Flachbandkabel (24) vorgesehen ist, das sich von dem Warmbereich (W) in den Kaltbereich (K) erstreckt.
23. Sensoreinrichtung nach Anspruch 21 oder 22, dadurch gekennzeichnet, daß zur Versorgung der Sensorelemente (6, 7) mit einem Einstellstrom ( $I_B$ ) in dem

Kaltbereich (K) ein Wechselstromtransformator (28) mit kleinerer Windungszahl ( $w_2$ ) auf der Anschlußseite der Sensorelemente als auf der Seite einer externen Stromversorgung in dem Warmbereich (W) vorgesehen ist.

24. Sensoreinrichtung nach einem der Ansprüche 21 bis 23, dadurch gekennzeichnet, daß in dem Kaltbereich (K) zu einer Spannungsauslese jeder Sensoreinheit ( $S_i$ ) ein Wechselstrombetrieb mit einem Resonanzkreis (32<sub>i</sub>) und einer in den Warmbereich (W) führenden Ausleseleitung (33<sub>i</sub>) vorgesehen ist.

25. Sensoreinrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zu einer Spannungsauslese jeder Sensoreinheit ( $S_i$ ) eine signalverarbeitende Elektronik vorgesehen ist, die zumindest einen Verstärker (30<sub>i</sub>, 38), einen Filter (35), einen A/D-Wandler (36) sowie eine nachgeordnete Recheneinheit (37) enthält.

26. Sensoreinheit nach Anspruch 25, gekennzeichnet durch eine Rückkopplungsleitung (42, 43) von der signalverarbeitenden Elektronik zu einer induktiv an die jeweilige Sensoreinheit ( $S_i$ ) angekoppelte Rückkopplungsspule (46, 47).

27. Sensoreinrichtung nach einem der Ansprüche 21 bis 23, gekennzeichnet durch ein Kryostatengehäuse (50) mit einer Bewandung (51) in geringem Abstand von unter 1 cm von der Array-Anordnung (20).

28. Sensoreinrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Sensoreinheiten der einen Gruppe (G1) zur Detektion von  $\partial B_z / \partial y$ -Magnetfeldgradienten und die Sensoreinheiten der anderen Gruppe (G2) zur Detektion von  $\partial B_z / \partial x$ -Magnetfeldgradienten vorgesehen sind.

29. Sensoreinrichtung nach Anspruch 28, dadurch gekennzeichnet, daß mittels einer weiteren Gruppe (G3) von Sensoreinheiten eine Detektion von  $\partial B_z / \partial z$ -Magnetfeldgradienten vorgesehen ist.

30. Sensoreinrichtung nach Anspruch 29, gekennzeichnet durch eine Anordnung der Gruppen (G1, G1'; G2, G2'; G3, G3') auf den Flachseiten einer würfelförmigen Trägerstruktur (61).

---

Hierzu 10 Seite(n) Zeichnungen

---

45

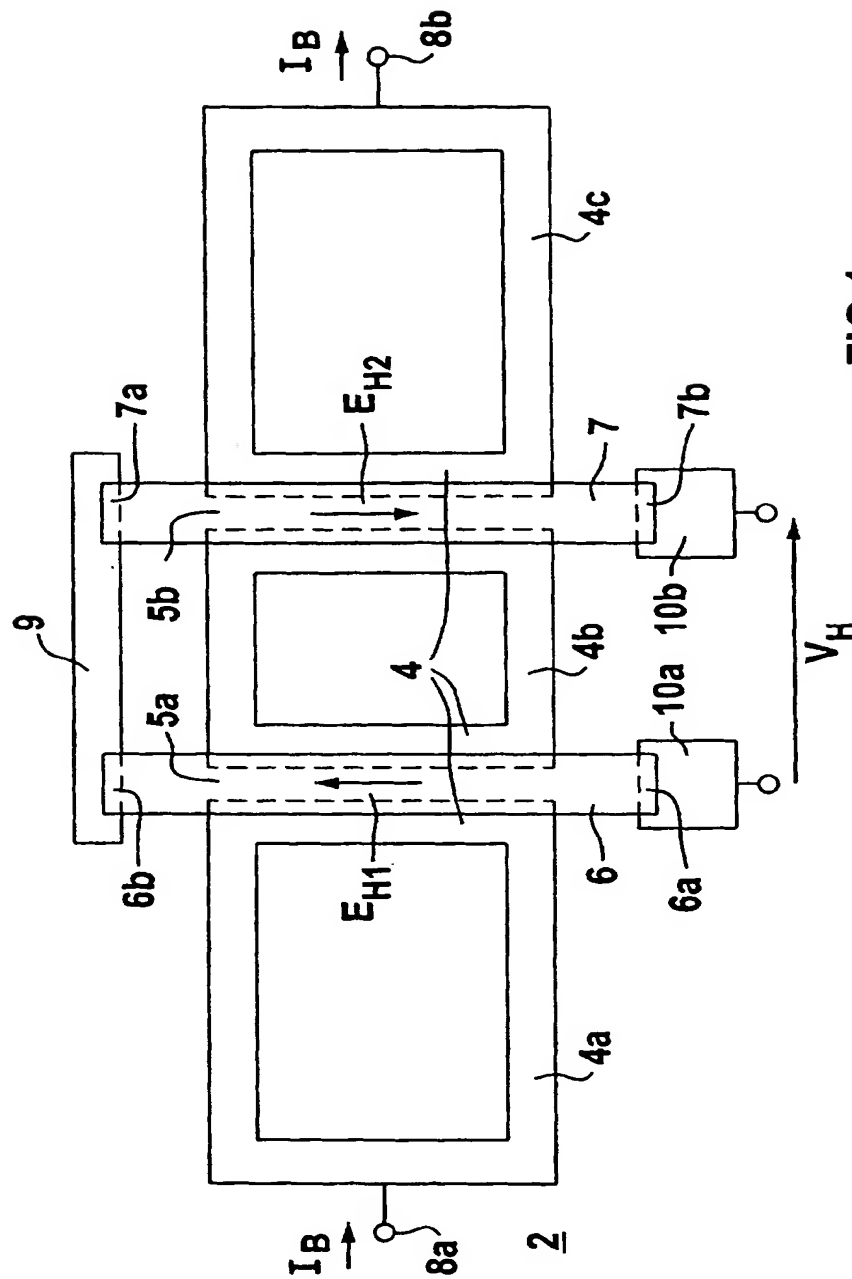
50

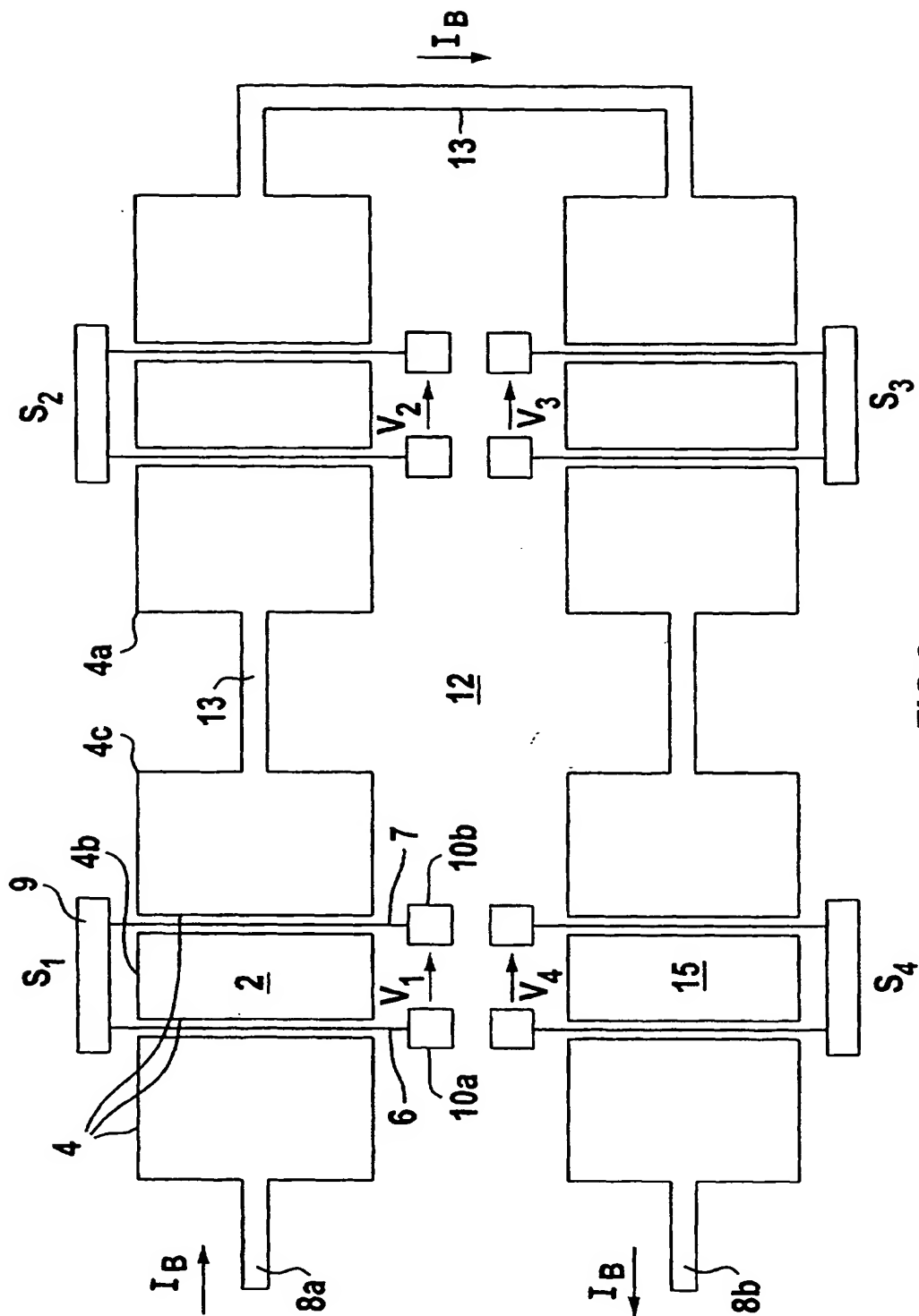
55

60

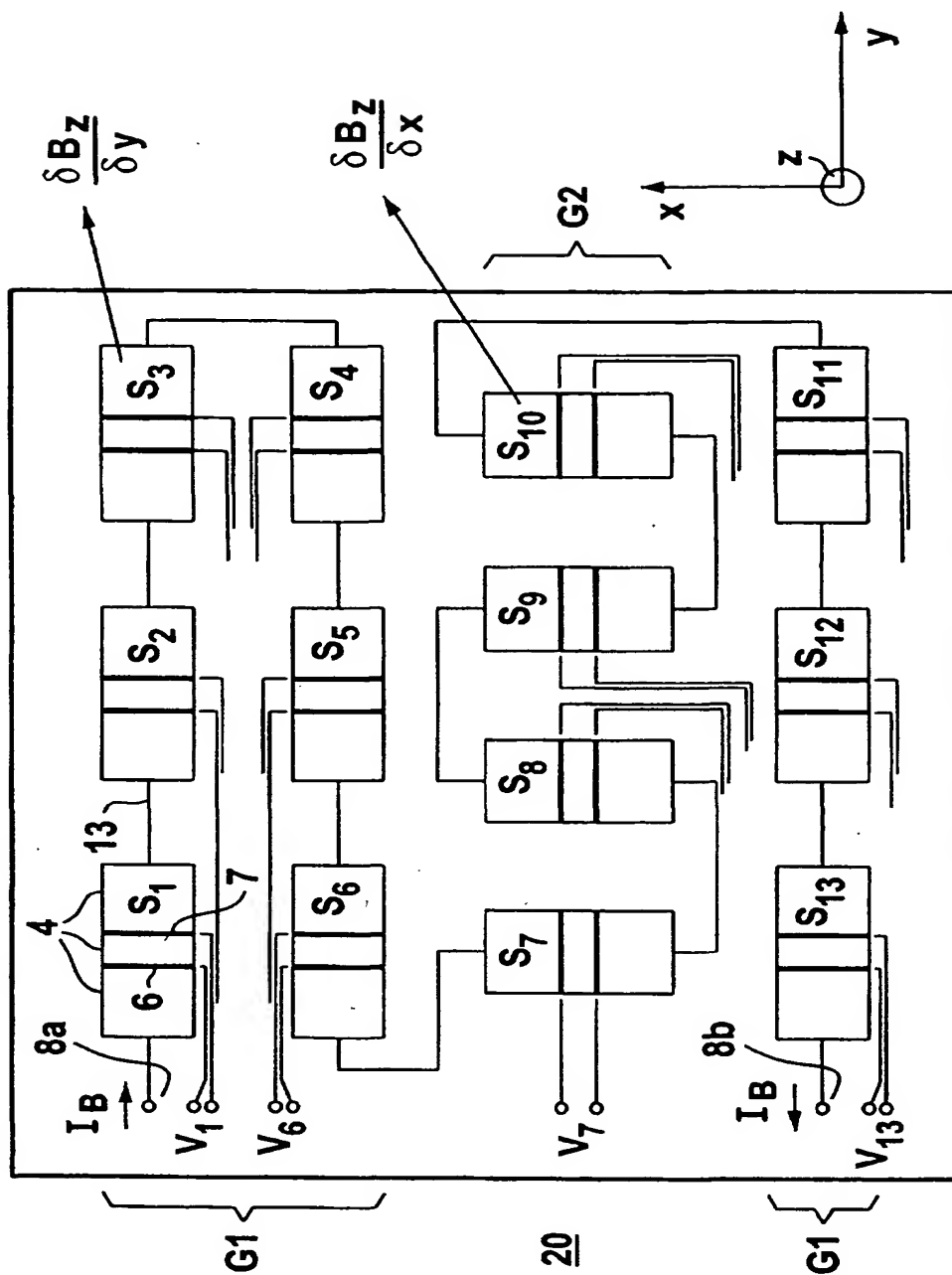
65

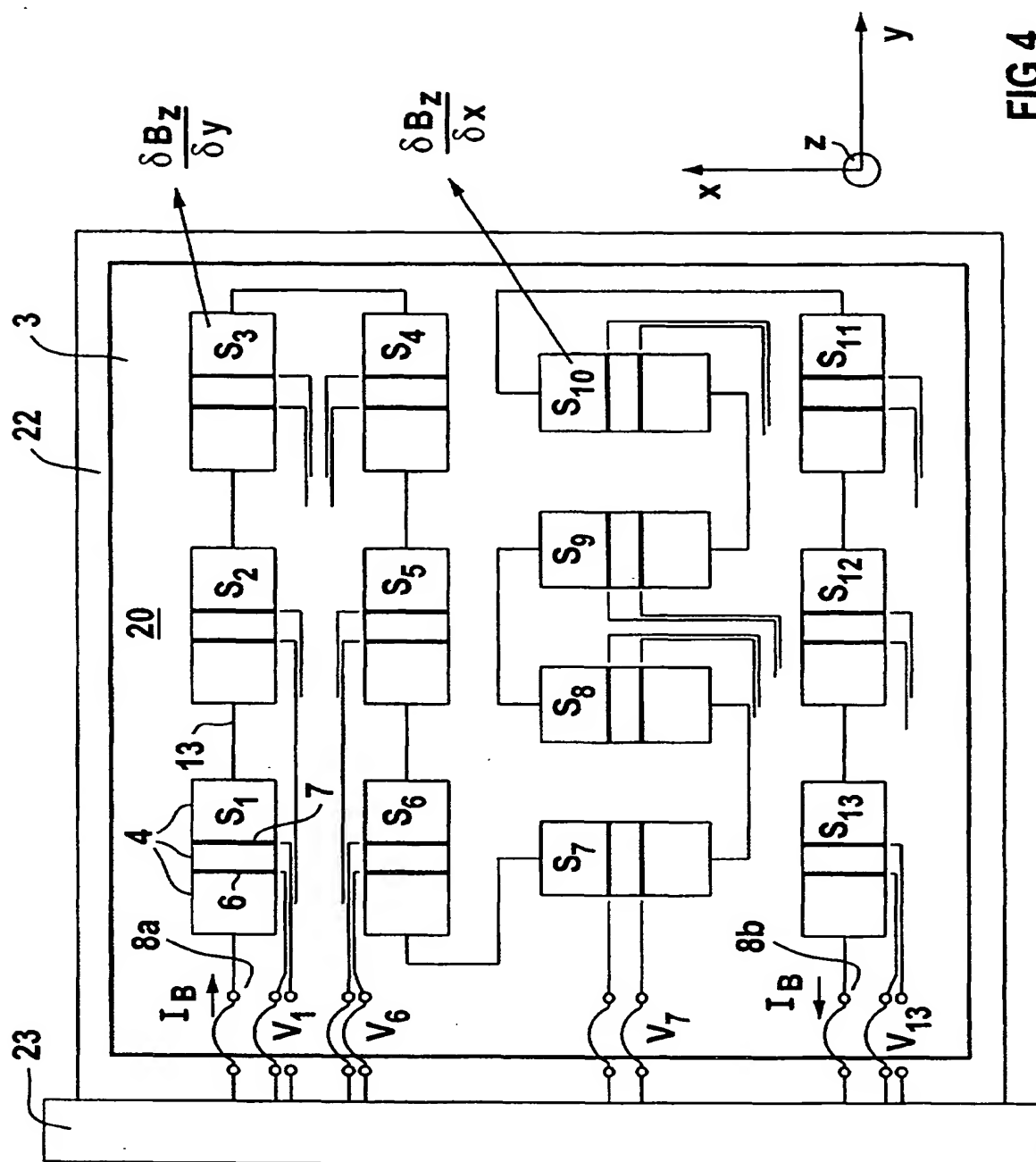




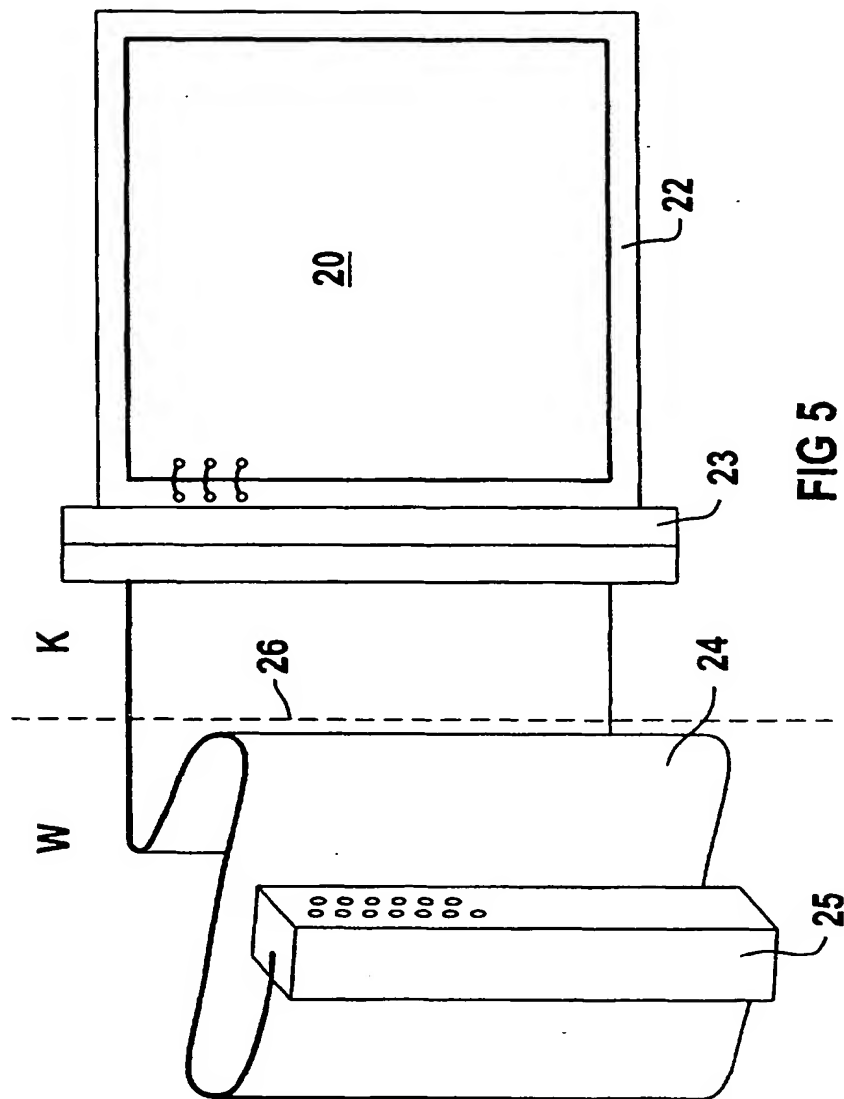


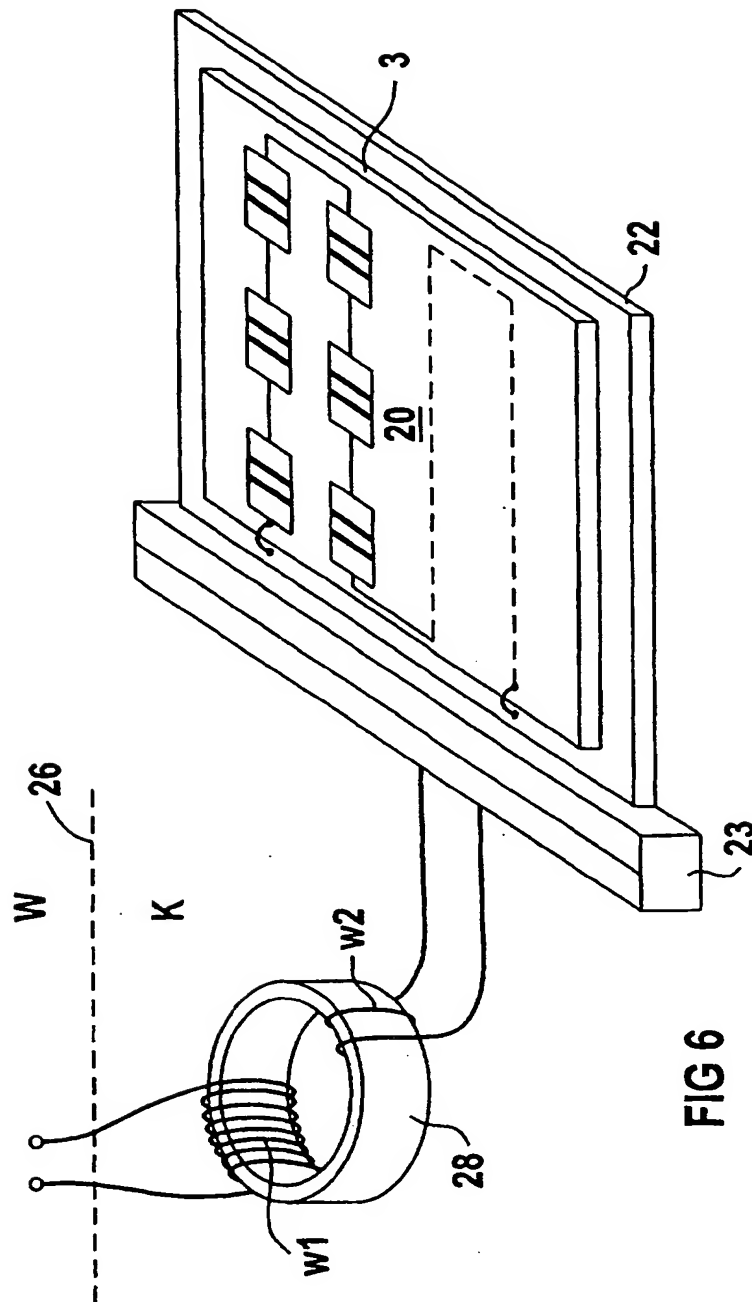
**FIG 2**





**FIG 4**







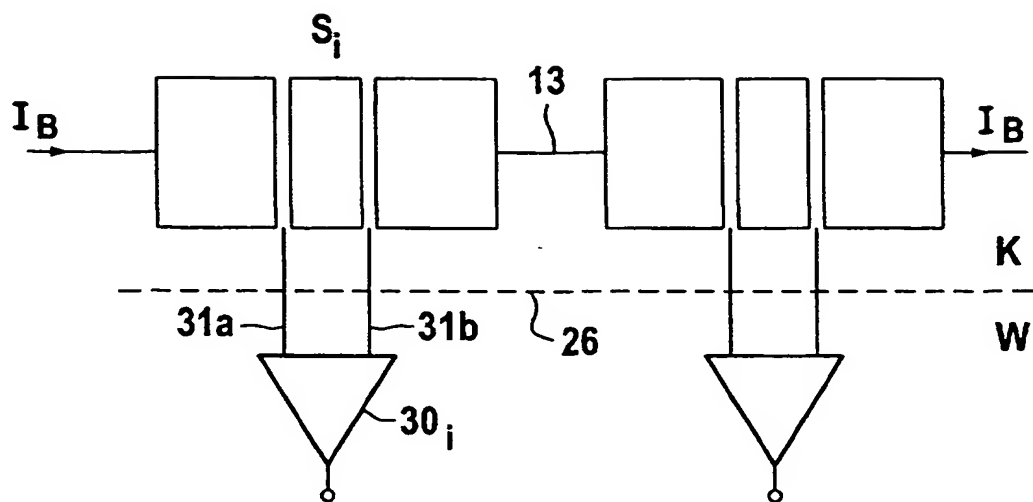


FIG 7

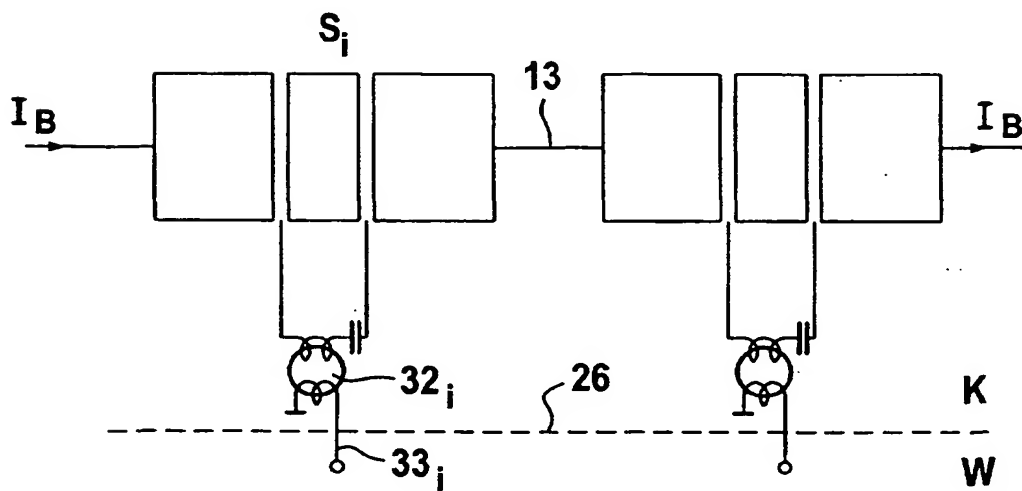
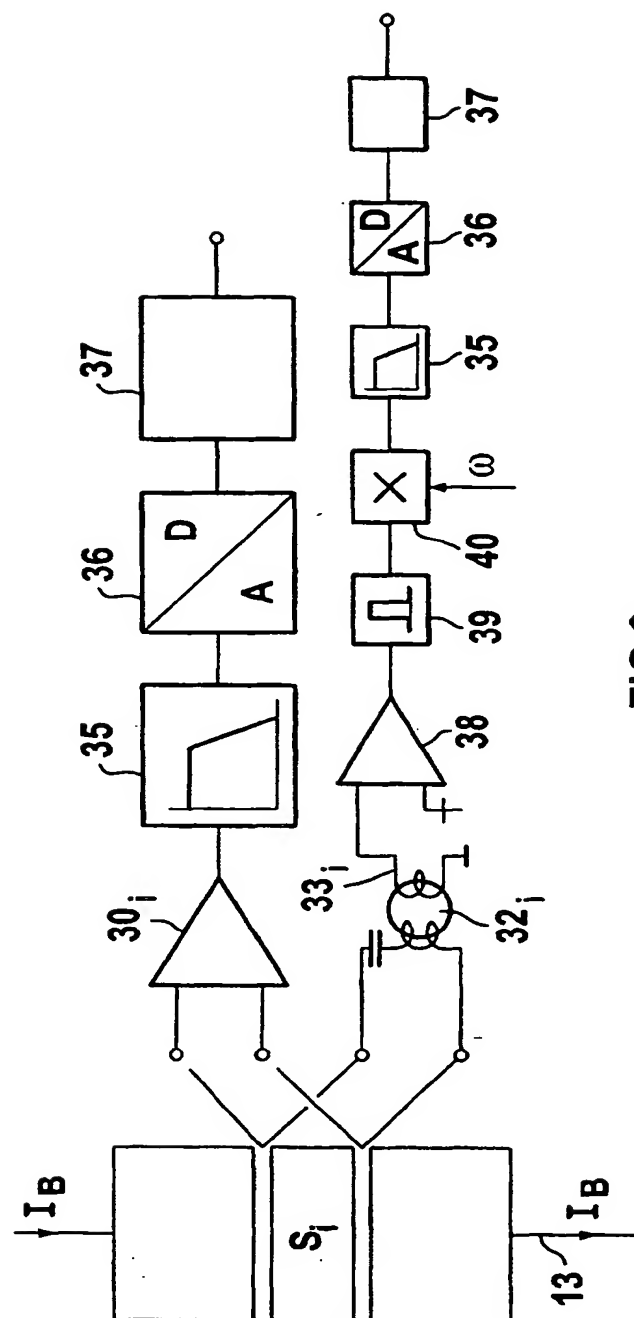


FIG 8

**FIG 9**

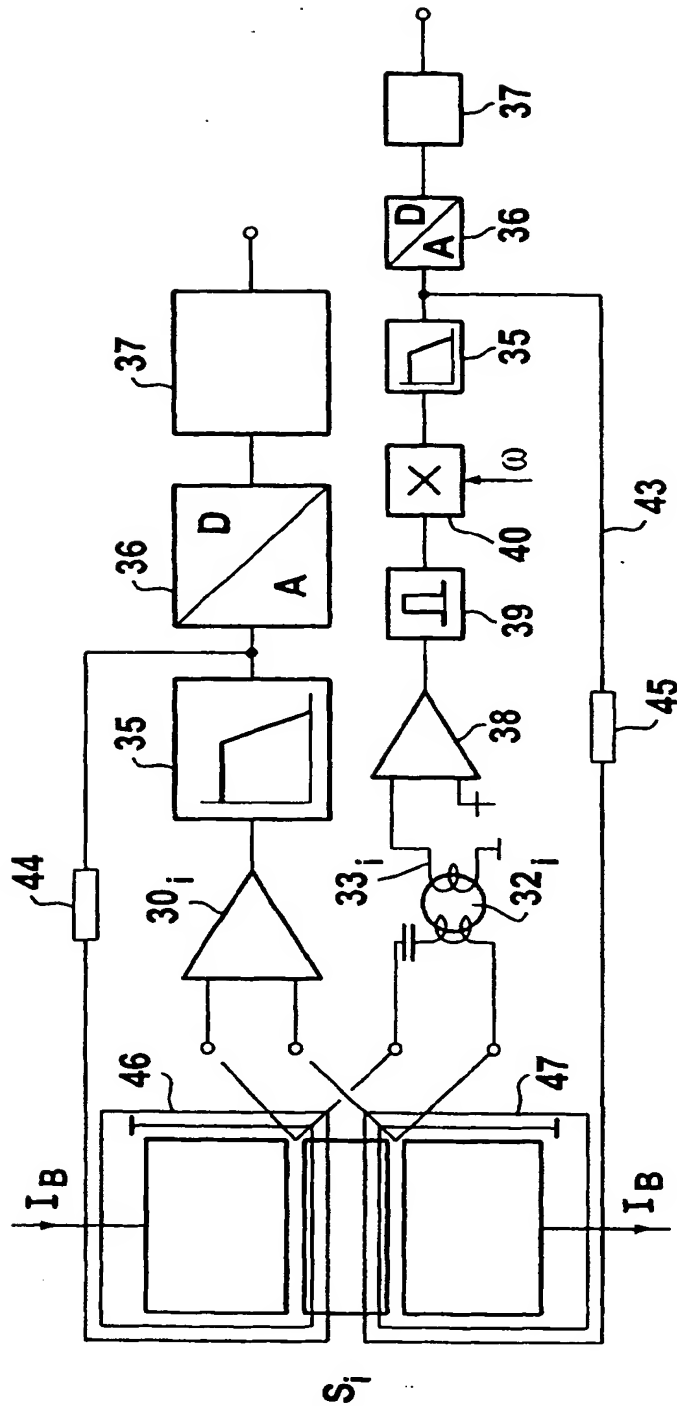
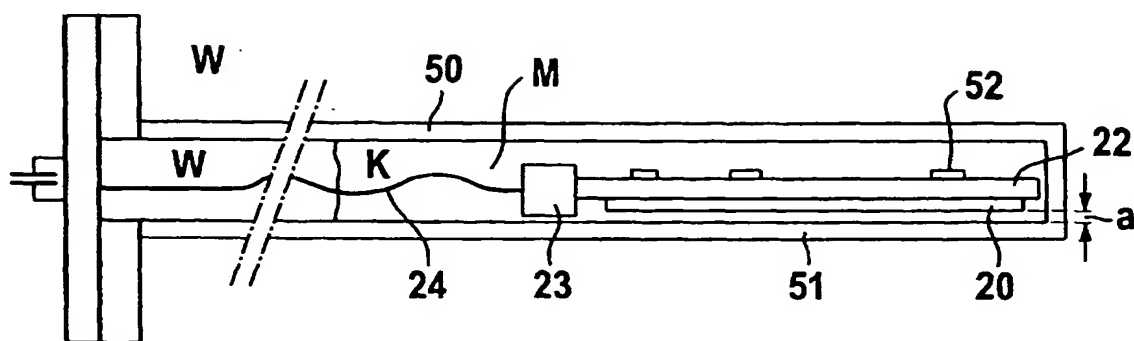
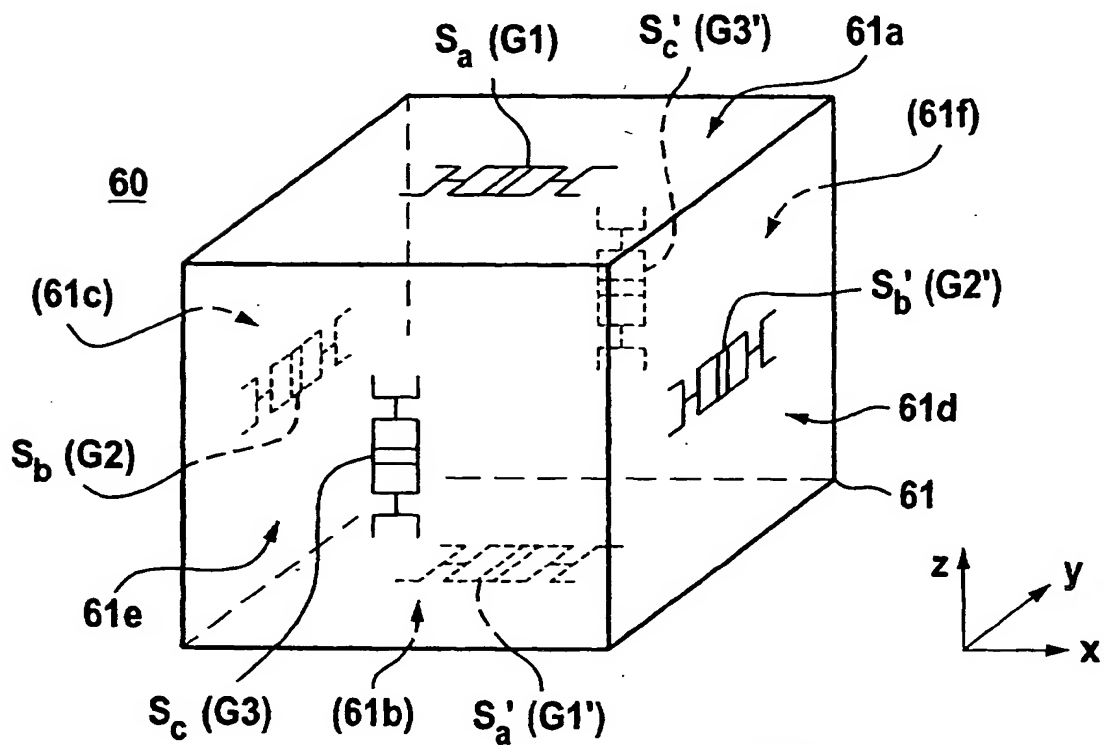


FIG 10



**FIG 11**



**FIG 12**

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☒ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**